



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 198 23 193 A 1

51 Int. Cl.⁶:
G 01 N 9/00
G 01 N 9/34
G 01 N 9/24

21 Aktenzeichen: 198 23 193.8
22 Anmeldetag: 23. 5. 98
43 Offenlegungstag: 11. 11. 99

66 Innere Priorität:
198 20 898. 7 09. 05. 98

71 Anmelder:
Ruhrgas AG, 45138 Essen, DE

74 Vertreter:
Zenz, Helber, Hosbach & Partner, 45128 Essen

72 Erfinder:
Jaeschke, Manfred, Dr., 46286 Dorsten, DE;
Kleinrahm, Reiner, Dr., 44801 Bochum, DE; Mellado,
Bernabé Gómez, 44787 Bochum, DE

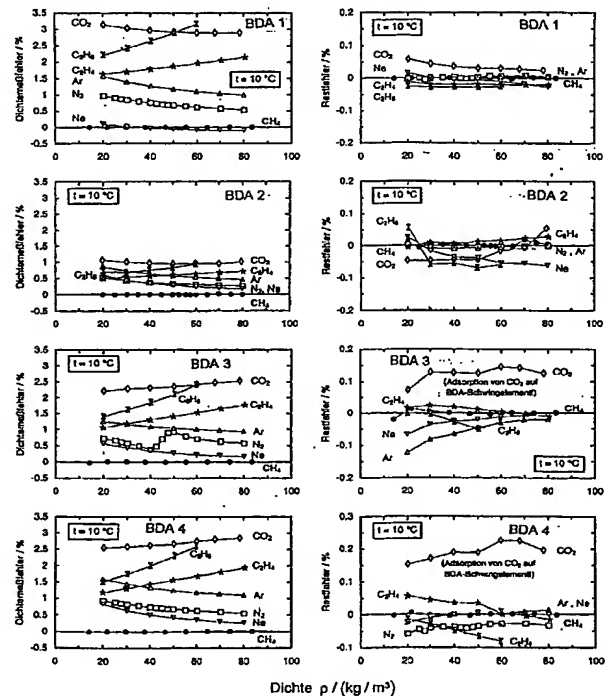
66 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

DE 33 10 492 C2
DE 197 07 659 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Verfahren zur Bestimmung der Dichte eines Gases unter Betriebsbedingungen

57 Die Dichte eines Gases unter Betriebsbedingungen kann mit den heute serienmäßig verfügbaren Betriebsdichteaufnehmern lediglich mit einer Genauigkeit von 3% gemessen werden. Bei dem neuen Verfahren wird ein ein Schwingkörper enthaltender Betriebsdichteaufnehmer mit Hilfe eines Kalibriergases geeicht. Anschließend wird ein Dichtemeßwert des Gases unter Betriebsbedingungen mit Hilfe des Betriebsdichteaufnehmers gemessen. Außerdem wird die Schallgeschwindigkeit und die Viskosität sowohl des Gases als auch des Kalibriergases jeweils unter Betriebsbedingungen bestimmt. Die Dichte des Gases unter Betriebsbedingungen wird aus dem Dichtemeßwert mit Hilfe einer von der Schallgeschwindigkeit und der Viskosität des Gases und des Kalibriergases abhängigen Korrekturfunktion mit einem Fehler unterhalb von 0,1% bestimmt.



DE 198 23 193 A 1

DE 198 23 193 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Dichte eines Gases, insbesondere von Erdgas, unter Betriebsbedingungen, wobei ein Schwingkörper enthaltender Betriebsdichteaufnehmer mit Hilfe eines Kalibrierungsgases geeicht wird, und ein Dichtemeßwert des Gases unter Betriebsbedingungen mit Hilfe des Betriebsdichteaufnehmers gemessen wird.

Als Schwingkörper können in den Betriebsdichteaufnehmern z. B. Schwinggabeln oder Schwingzylinder verwendet werden. Zur Messung eines Dichtemeßwertes wird der Schwingkörper an seiner Oberfläche dem zu untersuchenden Gas ausgesetzt. Bei Anregung des Schwingkörpers in dem Betriebsdichteaufnehmer wird auch das umgebende Gas zu Schwingungen angeregt. Es werden Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen im Gas erzeugt, die sich mit Schallgeschwindigkeit fortpflanzen. Dadurch wird vom schwingenden System Energie an das umgebende Gas abgegeben. Die vom Schwingkörper abgestrahlte Energie wird im Gas in kinetische Energie umgewandelt. Aufgrund der von der Dichte des umgebenden Gases abhängigen Dämpfung des Schwingkörpers nimmt die Periodendauer der Schwingungen zu und deren Frequenz ab.

Bei der Kalibrierung eines Betriebsdichteaufnehmers mit einem Kalibrierungsgas wird ein Zusammenhang zwischen der Dichte des Kalibrierungsgases und der Frequenz des Schwingkörpers aufgestellt.

Wird der Dichteaufnehmer anschließend zur Bestimmung der Dichte eines Gases bei Betriebsbedingungen verwendet, welches eine andere Zusammensetzung als das Kalibrierungsgas aufweist, treten systematische Meßfehler bis zu ca. 3% aufgrund des Gasarteneinflusses auf.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein kostengünstiges Verfahren zur Verfügung zu stellen, um die Dichte eines Gases unter Betriebsbedingungen genauer bestimmen zu können.

Diese Aufgabe wird bei einem gattungsgemäßen Verfahren erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Dichte oder Schallgeschwindigkeit sowohl des Gases als auch des Kalibrierungsgases jeweils unter Normbedingungen erfaßt wird und die Dichte des Gases unter Betriebsbedingungen aus dem Dichtemeßwert mit Hilfe einer von der Differenz der Dichten oder der Schallgeschwindigkeiten des Gases und des Kalibrierungsgases unter Normbedingungen abhängigen Korrekturfunktion bestimmt wird.

Eine äußerst einfache Korrekturfunktion lautet z. B. wie folgt:

$$\rho_{\text{korr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{\rho_n} \cdot \Delta \rho_n] \quad (1),$$

wobei K_{ρ_n} eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur ist, und

$$\Delta \rho_n = \rho_{n,\text{mess}} - \rho_{n,\text{kal}}.$$

Genauso einfach kann die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt werden:

$$\rho_{\text{korr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{c_n} \cdot \Delta c_n] \quad (2),$$

wobei K_{c_n} eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur ist, und

$$\Delta c_n = c_{n,\text{mess}} - c_{n,\text{kal}}.$$

Eine Weiterbildung der Erfindung, die eine noch etwas genauere Bestimmung der Dichte des Gases ermöglicht, ist dadurch gekennzeichnet, daß außerdem der Brennwert des Gases und des Kalibrierungsgases unter Normbedingungen erfaßt wird und daß die Korrekturfunktion, die zur Bestimmung der unter Betriebsbedingungen gemessenen Dichte verwendet wird, vom Brennwert des Gases und des Kalibrierungsgases unter Normbedingungen abhängig ist.

Beispielsweise kann die Korrekturfunktion in diesem Fall die folgende Form haben:

$$\rho_{\text{korr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{\rho_n} \cdot \Delta \rho_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n] \quad (3),$$

wobei K_{ρ_n} und K_{H_n} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, und

$$\Delta \rho_n = \rho_{n,\text{mess}} - \rho_{n,\text{kal}} \text{ und} \\ \Delta H_n = H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{kal}}.$$

Stehen bei einer speziellen Anwendung bereits Schallgeschwindigkeitswerte für das Gas und das Kalibrierungsgas unter Normbedingungen zur Verfügung, so kann die Dichte des Gases alternativ mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt werden:

$$\rho_{\text{korr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{c_n} \cdot \Delta c_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n] \quad (4),$$

wobei K_{c_n} und K_{H_n} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, und

$$\Delta c_n = c_{n,\text{mess}} - c_{n,\text{kal}} \text{ und} \\ \Delta H_n = H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{kal}}.$$

Die Meßgenauigkeit zur Bestimmung der Dichte des Gases kann dadurch weiter erhöht werden, daß außerdem die Temperatur des Gases unter Betriebsbedingungen (T_{mess}) und die Temperatur des Kalibrierungsgases beim Kalibrieren (T_{kal})

erfaßt werden und daß die Korrekturfunktion, die zur Bestimmung der unter Betriebsbedingungen gemessenen Dichte verwendet wird, von der Betriebstemperatur des Gases und der Kalibriertemperatur des Kalibriergases abhängig ist.

Naturgemäß läßt sich dabei die höchste Genauigkeit dadurch erzielen, daß sowohl der Brennwert des Gases und des Kalibriergases unter Normbedingungen als auch die Betriebstemperatur und die Kalibriertemperatur erfaßt werden.

Es hat sich gezeigt, daß die Dichte des Gases besonders zuverlässig mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt werden kann:

$$\rho_{\text{korr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{\rho_n} \cdot \Delta\rho_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n] + K_T \cdot \Delta T \quad (5),$$

wobei K_{ρ_n} und K_{H_n} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, K_T eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} ist, und

$$\begin{aligned} \Delta\rho_n &= \rho_{n,\text{mess}} - \rho_{n,\text{kal}}, \\ \Delta H_n &= H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{kal}} \text{ und} \\ \Delta T &= T_{\text{mess}} - T_{\text{kal}}. \end{aligned}$$

Genauso zuverlässige Ergebnisse für die Dichte können mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt werden:

$$\rho_{\text{korr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{c_n} \cdot \Delta c_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n] + K_T \cdot \Delta T \quad (6),$$

wobei K_{c_n} und K_{H_n} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, K_T eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} ist, und

$$\begin{aligned} \Delta c_n &= c_{n,\text{mess}} - c_{n,\text{kal}}, \\ \Delta H_n &= H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{kal}} \text{ und} \\ \Delta T &= T_{\text{mess}} - T_{\text{kal}}. \end{aligned}$$

Eine Weiterbildung der Erfindung, mit der die Dichte des Gases unter Betriebsbedingungen noch genauer bestimmt werden kann ist dadurch gekennzeichnet, daß außerdem der Kohlenstoffdioxidanteil des Gases und des Kalibriergases ($x_{\text{CO}_2,\text{mess}}$, $x_{\text{CO}_2,\text{kal}}$) erfaßt wird und daß die Korrekturfunktion, die zur Bestimmung der unter Betriebsbedingungen gemessenen Dichte verwendet wird, von dem Kohlenstoffdioxidanteil des Gases und des Kalibriergases abhängig ist.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die Dichte des Gases dabei mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt:

$$\rho_{\text{korr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{\rho_n} \cdot \Delta\rho_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n + K_{\text{CO}_2} \cdot \Delta x_{\text{CO}_2}] + K_T \cdot \Delta T \quad (7),$$

wobei K_{ρ_n} , K_{H_n} und K_{CO_2} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, K_T eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} ist, und

$$\begin{aligned} \Delta\rho_n &= \rho_{n,\text{mess}} - \rho_{n,\text{kal}}, \\ \Delta H_n &= H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{kal}}, \\ \Delta T &= T_{\text{mess}} - T_{\text{kal}} \text{ und} \\ \Delta x_{\text{CO}_2} &= x_{\text{CO}_2,\text{mess}} - x_{\text{CO}_2,\text{kal}}. \end{aligned}$$

Alternativ kann die Dichte des Gases mit der folgenden Korrekturfunktion bestimmt werden:

$$\rho_{\text{korr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{c_n} \cdot \Delta c_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n + K_{\text{CO}_2} \cdot \Delta x_{\text{CO}_2}] + K_T \cdot \Delta T \quad (8),$$

wobei K_{c_n} , K_{H_n} und K_{CO_2} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, K_T eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} ist, und

$$\begin{aligned} \Delta c_n &= c_{n,\text{mess}} - c_{n,\text{kal}}, \\ \Delta H_n &= H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{kal}}, \\ \Delta T &= T_{\text{mess}} - T_{\text{kal}} \text{ und} \\ \Delta x_{\text{CO}_2} &= x_{\text{CO}_2,\text{mess}} - x_{\text{CO}_2,\text{kal}}. \end{aligned}$$

Vorzugsweise wird die Variable K_T mit Hilfe der folgenden einfachen Funktion bestimmt: $K_T = K_{T_0} + \rho_{\text{BDA}} \cdot K_{T_1}$, wobei K_{T_0} und K_{T_1} Konstanten sind.

Die oben genannte Aufgabe der vorliegenden Erfindung wird ferner von einem gattungsgemäßen Verfahren gelöst, das dadurch gekennzeichnet ist, daß die Schallgeschwindigkeit und die Viskosität sowohl des Gases als auch des Kalibriergases jeweils unter Betriebsbedingungen (c_{mess} , c_{kal} , η_{mess} , η_{kal}) bestimmt wird und die Dichte des Gases unter Betriebsbedingungen aus dem Dichtemeßwert mit Hilfe einer von der Schallgeschwindigkeit und der Viskosität des Gases und des Kalibriergases abhängigen Korrekturfunktion bestimmt wird.

Die Schallgeschwindigkeit und die Viskosität des Gases und des Kalibriergases können entweder unmittelbar gemessen werden oder aus anderen bekannten Meßgrößen abgeleitet werden. Die letztgenannte Möglichkeit wird in der Praxis aus Kostengründen bevorzugt.

Ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{\text{korrr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot \frac{1 + \frac{K_c^2}{\tau^2 \cdot c_{\text{Kal}}^2} + K_\eta \cdot \sqrt{\frac{\tau \cdot \eta_{\text{Kal}}}{\rho_{\text{BDA}}}}}{1 + \frac{K_c^2}{\tau^2 \cdot c_{\text{mess}}^2} + K_\eta \cdot \sqrt{\frac{\tau \cdot \eta_{\text{mess}}}{\rho_{\text{korrr}}}}} + \left[(K_{T_0} + \rho_{\text{BDA}} \cdot K_{T_1}) \cdot (T_{\text{mess}} - T_{\text{Kal}}) \right] , \quad (9)$$

10 wobei τ : Periodendauer des Schwingkörpers,
T: Temperatur und
 $K_c, K_\eta, K_{T_0}, K_{T_1}$ Konstanten sind.

Die mit Hilfe dieser Korrekturfunktion erreichbare Zuverlässigkeit bei der Bestimmung der Dichte des Gases unter Betriebsbedingungen ist beträchtlich. Dabei hat es sich bewährt, zur Bestimmung der schallgeschwindigkeitsabhängigen

15 Konstante K_c^2 Ethan als Referenzgas zu verwenden.

Für manche Anwendungsfälle, z. B. bei der Dichtebestimmung von Erdgas, kann eine entsprechend hohe Genauigkeit mit Hilfe der folgenden vereinfachten Korrekturfunktion erreicht werden:

$$\rho_{\text{korrr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot \left[1 + \frac{K_c^2}{\tau^2 \cdot c_{\text{Kal}}^2} \cdot \left(1 - \frac{c_{\text{Kal}}^2}{c_{\text{mess}}^2} \right) + K_\eta \cdot \sqrt{\frac{\tau \cdot \eta_{\text{Kal}}}{\rho_{\text{BDA}}}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\eta_{\text{mess}}}{\eta_{\text{Kal}}}} \right) \right] + \left[(K_{T_0} + \rho_{\text{BDA}} \cdot K_{T_1}) \cdot (T_{\text{mess}} - T_{\text{Kal}}) \right] , \quad (10)$$

wobei τ : Periodendauer des Schwingkörpers,
T: Temperatur und

30 $K_c, K_\eta, K_{T_0}, K_{T_1}$ Konstanten sind.

Grundsätzlich ist es vorteilhaft, den Betriebsdichteaufnehmer mit einem Kalibriergas zu kalibrieren, welches ungefähr die gleiche Zusammensetzung aufweist, wie das Meßgas, dessen Dichte anschließend gemessen werden soll. Soll die Dichte von Erdgas bestimmt werden, ist es vorteilhaft, daß Methan als Kalibriergas verwendet wird. Die Dichte von Methan ist mit sehr hoher Genauigkeit im Stand der Technik bekannt. Außerdem besteht Erdgas in der Regel zu wenigstens

35 80% aus Methan. Das Erdgas aus den GUS-Staaten enthält sogar mehr als 98% Methan. Somit bildet eine Kalibrierung mit Methan eine gute Basis für eine genaue Dichtebestimmung von Erdgas.

Vorzugsweise werden K_c^2 und K_η durch Kalibrierung mit einem zweiten Kalibriergas neben Methan, z. B. Argon, Ethen oder Stickstoff, bestimmt und werden als typenspezifische Konstanten behandelt, welche lediglich vom Betriebsdichteaufnehmertyp abhängen.

40 Es hat sich bewährt, daß die Schallgeschwindigkeit des Gases und/oder des Kalibriergases als Funktion der Dichte unter Betriebsbedingungen und der Dichte unter Normbedingungen und/oder der Temperatur und/oder des Brennwertes und/oder des Kohlenstoffdioxidanteils bestimmt wird. Auch hier gilt das Prinzip, daß die Schallgeschwindigkeit um so genauer bestimmt werden kann, je mehr Meßgrößen in die Funktion zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit eingehen. Die Genauigkeit bei der nachfolgenden Bestimmung der Dichte des Gases unter Betriebsbedingungen steigt dementsprechend.

45 Eine Weiterbildung der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, daß bei Bestimmung der Dichte von Erdgas als Kalibriergas Methan verwendet wird, daß die Schallgeschwindigkeit von Methan (c_{CH_4}) nach folgender Gleichung berechnet wird:

$$50 \quad c_{\text{CH}_4} = A_0 + (A_1 + A_2 \cdot T_{\text{mess}}) \cdot T_{\text{mess}} + (A_3 + A_4 \cdot \rho_{\text{BDA}} + A_5 \cdot \rho_{\text{BDA}}^2) \cdot \rho_{\text{BDA}} + (A_6 + A_7 \cdot T_{\text{mess}}) \cdot T_{\text{mess}} \cdot \rho_{\text{BDA}} \quad (11)$$

und die Schallgeschwindigkeit des Erdgases (c_{mess}) nach folgender Gleichung bestimmt wird:

$$55 \quad c_{\text{mess}} = c_{\text{CH}_4} + [(B_1 + B_2 \cdot \Delta \rho_n + B_3 \cdot T_{\text{mess}}) + (B_4 + B_5 \cdot T_{\text{mess}} + B_6 \cdot \rho_{\text{BDA}} + B_7 \cdot \rho_{\text{BDA}} \cdot \Delta \rho_n) \cdot \rho_{\text{BDA}}] \cdot \Delta \rho_n + [(C_1 + C_2 \cdot T_{\text{mess}}) + (C_3 + C_4 \cdot \rho_{\text{BDA}} + C_5 \cdot T_{\text{mess}}) \cdot \rho_{\text{BDA}}] \cdot \Delta H_n + [D_1 \cdot \rho_{\text{BDA}}] \cdot X_{\text{CO}_2} \quad (12),$$

wobei A_0 – A_7 , B_1 – B_7 , C_1 – C_5 und D_1 Konstanten sind, X_{CO_2} den Kohlenstoffdioxidanteil im Erdgas angibt,

$\Delta \rho_n = \rho_{n,\text{mess}} - \rho_{n,\text{CH}_4}$ und

60 $\Delta H_n = H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{CH}_4}$.

Die Gleichungen (11) und (12) sind sehr einfach aufgebaut und hinreichend genau. Mit ihnen kann die Schallgeschwindigkeit mit einem Fehler unterhalb von 0,1% bestimmt werden.

Vorteilhafterweise wird die Viskosität des Gases und/oder des Kalibriergases als Funktion der Dichte unter Betriebsbedingungen und der Dichte unter Normbedingungen und/oder der Temperatur und/oder des Brennwertes bestimmt. Gehen alle Meßgrößen in die Funktion zur Bestimmung der Viskosität des Gases bzw. des Kalibriergases ein, läßt sich die Viskosität des Gases mit der höchsten Genauigkeit bestimmen. Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Dichte des Gases ist entsprechend hoch.

Beispielsweise kann, wenn bei Bestimmung der Dichte von Erdgas als Kalibriergas Methan verwendet wird, die Viskosität von Methan verwendet werden, die Viskosität von Methan (η_{CH_4}) nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\eta_{CH_4} = A_0 + A_1 \cdot T + (A_2 + A_3 \cdot \rho_{BDA}) \cdot \rho_{BDA} \quad (13)$$

und die Viskosität des Erdgases (η_{mess}) nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\eta_{mess} = \eta_{CH_4} + B_1 (1 - \rho_{BDA}) \cdot \Delta \rho_n + B_2 \cdot \Delta H_n \quad (14)$$

wobei A_0 – A_3 , B_1 und B_2 Konstanten sind,

$$\Delta \rho_n = \rho_{n,mess} - \rho_{n,CH_4} \text{ und} \\ \Delta H_n = H_{n,mess} - H_{n,CH_4}$$

Auch die Gleichungen (13) und (14) sind sehr einfach aufgebaut. Die mit ihnen bestimmten Viskositäten sind nur mit einem Fehler deutlich unterhalb von 5% behaftet und somit hinreichend genau für die Korrektur des Dichtemeßwertes.

Es hat sich bewährt, daß zum Auffinden der Parameter und Konstanten geeigneter Funktionen, insbesondere der Korrekturfunktionen, mehrere Meßzyklen mit Referenzgasen durchgeführt werden, deren Zusammensetzungen bekannt sind. Als Referenzgleichung zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit kann z. B. die AGA-8-DC92-Zustandsgleichung verwendet werden. Voraussetzung für deren Anwendung ist jedoch die exakte Kenntnis der Zusammensetzung der Referenzgase. Als Referenzgleichung zur Berechnung der Viskosität von Erdgasen kann z. B. der Ansatz von Herning und Zipperer gewählt werden. Vorteilhafterweise sollten die Referenzgase den Bereich der Zusammensetzungen abdecken, in denen die Zusammensetzungen der späteren Meßgase voraussichtlich liegen.

Im folgenden wird die Erfindung anhand mehrerer in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert. In der Zeichnung zeigen:

Fig. 1 acht Diagramme, in denen der Dichtemeßfehler gegen die Dichte für sechs reine Gase und vier verschiedene Betriebsdichteaufnehmer bei $T = 10^\circ C$ aufgetragen ist, und zwar in der linken Spalte bei Anwendung des bekannten Verfahrens und in der rechten Spalte bei Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 2 acht Diagramme, in denen der Dichtemeßfehler gegen die Dichte für sechs Erdgase und die vier verschiedenen Betriebsdichteaufnehmer bei $T = 10^\circ C$ aufgetragen ist, und zwar in der linken Spalte bei Anwendung des bekannten Verfahrens und in der rechten Spalte bei Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 3 acht Diagramme, in denen der Dichtemeßfehler für Ekofisk-Erdgas und die vier verschiedenen Betriebsdichteaufnehmer bei verschiedenen Temperaturen gegen die Dichte aufgetragen ist, und zwar in der linken Spalte bei Anwendung des bekannten Verfahrens und in der rechten Spalte bei Anwendung eines zweiten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 4 sechs Diagramme, die die Wirkungsweise des erfindungsgemäßen Verfahrens gemäß **Fig. 1** und **2** veranschaulichen;

Fig. 5 sechs Diagramme, die die Wirkungsweise eines dritten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens veranschaulichen.

In **Fig. 1** ist der Dichtemeßfehler gegen die Dichte für sechs reine Gase bei $T = 10^\circ C$ aufgetragen, und zwar untereinander für vier verschiedene Typen von Betriebsdichteaufnehmern. In der linken Spalte sind die Dichtemeßfehler bei der Dichtemessung gemäß dem Stand der Technik und in der rechten Spalte die verbleibenden Restfehler bei Einsatz des erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel wurde die Dichte unter Verwendung der folgenden Korrekturfunktion bestimmt:

$$\rho_{korrr} = \rho_{BDA} \cdot \left[1 + \frac{K_c^2}{\tau^2 \cdot C_{Ka1}^2} \cdot \left(1 - \frac{C_{Ka1}^2}{C_{mess}^2} \right) + K_\eta \cdot \sqrt{\frac{\tau \cdot \eta_{Ka1}}{\rho_{BDA}}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\eta_{mess}}{\eta_{Ka1}}} \right) \right] \quad (15)$$

Die Betriebsdichteaufnehmer wurden vor der Messung bei $10^\circ C$ mit Methan kalibriert. Es wurden anschließend die reinen Gase (N_2 , CO_2 , C_2H_6 , C_2H_4 , Ar, Ne) untersucht, da sie jeweils charakteristische Eigenschaften aufweisen und einen großen Schallgeschwindigkeits- und Viskositätsbereich abdecken. Wie deutlich sichtbar ist, gelingt es mit dem erfindungsgemäßen Verfahren den systematischen Dichtemeßfehler von bis zu 3% auf weniger als 0,1% zu reduzieren. Mit dem neuen Verfahren kann der Dichtemeßfehler somit wirksam auf ungefähr 1/30 des ursprünglichen Meßfehlers gesenkt werden.

Fig. 2 unterscheidet sich lediglich dadurch von der **Fig. 1**, daß in den Diagrammen die Meßwerte für sechs Erdgase bei $T = 10^\circ C$ aufgetragen sind. Die Betriebsdichteaufnehmer wurden wie in **Fig. 1** mit Methan bei $10^\circ C$ kalibriert. Wie den Diagrammen klar zu entnehmen ist, kann der systematische Meßfehler bei Erdgasen von bis zu ca. +0,5% auf weniger als 0,05% reduziert werden, also auf weniger als 1/10 des ursprünglichen Meßfehlers. Das erfindungsgemäße Verfahren ist somit auch für Erdgase sehr wirksam.

Die Betriebsdichteaufnehmer werden in der Regel nur bei einer konstanten Temperatur, z. B. $10^\circ C$, kalibriert. Weicht die Betriebstemperatur von der Kalibriertemperatur ab, treffen folglich durch den Temperaturunterschied bedingte zusätzliche Dichtemeßfehler auf. Mit dem in **Fig. 3** veranschaulichten Ausführungsbeispiel der Erfindung können auch diese zusätzlichen Dichtemeßfehler behoben werden. In **Fig. 3** sind auf der linken Seite die systematischen Dichtemeßfehler für Ekofisk-Erdgas bei den drei Temperaturen, $T = 0^\circ C$, $10^\circ C$ und $20^\circ C$ für vier verschiedene Typen von Betriebsdichteaufnehmern aufgetragen. In den Diagrammen auf der rechten Seite sind die Restfehler bei Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt.

dungsgemäßen Verfahrens eingezeichnet. Bei diesem Ausführungsbeispiel wurde die Korrekturfunktion (10) verwendet:

$$\rho_{\text{korrr}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot \left[1 + \frac{K_c^2}{\tau^2 \cdot c_{\text{kal}}^2} \cdot \left(1 - \frac{c_{\text{kal}}^2}{c_{\text{mess}}^2} \right) + K_\eta \cdot \sqrt{\frac{\tau \cdot \eta_{\text{kal}}}{\rho_{\text{BDA}}}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\eta_{\text{mess}}}{\eta_{\text{kal}}}} \right) \right] \\ + \left[(K_{T0} + \rho_{\text{BDA}} \cdot K_{T1}) \cdot (T_{\text{mess}} - T_{\text{kal}}) \right] ,$$

wobei τ : Periodendauer des Schwingkörpers,
T: Temperatur und
 K_c , K_η , K_{T0} , K_{T1} Konstanten sind.

Wie zu sehen ist, können auch in diesem Fall die Dichtemeßfehler von rund +0,5% auf weniger als 0,05% reduziert werden.

In Fig. 4 ist die Wirkungsweise der Ausführungsbeispiele gemäß den Fig. 1 und 2 veranschaulicht.

Die Korrekturfunktion (9) kann einfach in die folgende Form gebracht werden:

$$\frac{\rho_{\text{BDA}} - \rho_{\text{korrr}}}{\rho_{\text{korrr}}} = K_c^2 \cdot c^* + K_\eta \cdot \eta^* , \quad (16)$$

wobei c^* ein Schallgeschwindigkeitsparameter ist, nämlich

$$c^* = \frac{1}{\tau^2} \cdot \left(\frac{1}{c_{\text{mess}}^2} - \frac{\rho_{\text{BDA}}}{\rho_{\text{korrr}}} \cdot \frac{1}{c_{\text{kal}}^2} \right) , \quad (17)$$

und η^* ein Viskositätsparameter ist, nämlich

$$\eta^* = \sqrt{\tau} \cdot \left(\sqrt{\frac{\eta_{\text{mess}}}{\rho_{\text{korrr}}}} - \frac{\rho_{\text{BDA}}}{\rho_{\text{korrr}}} \cdot \sqrt{\frac{\eta_{\text{kal}}}{\rho_{\text{BDA}}}} \right) . \quad (18)$$

Hierbei sind K_c^2 und K_η typenspezifische Aufnehmerkonstanten.

Im Diagramm 1 von Fig. 4 ist der Dichtemeßfehler gegen die Dichte für sechs reine Gase aufgetragen. Diagramm 2 unterscheidet sich dadurch von Diagramm 1, daß der Dichtemeßfehler statt gegen die Dichte gegen den Schallgeschwindigkeitsparameter c^* aufgetragen ist. Wie dieses Diagramm bestätigt hängt der Dichtemeßfehler linear von dem Schallgeschwindigkeitsparameter c^* ab. Die eingezeichnete Gerade wurde mit Hilfe der verschiedenen Meßwerte angepaßt und liefert als Steigung die typenspezifische Aufnehmerkonstante K_c^2 .

Im Diagramm 3 der Fig. 4 ist der Restfehler der Dichte aufgetragen, der sich ergibt, wenn die Korrektur bezüglich des Schallgeschwindigkeitsparameters bereits durchgeführt wurde. Dieser Restfehler ist gegen den Schallgeschwindigkeitsparameter c^* aufgetragen. Während die Werte für Ethylen, Argon und Ethan bereits nur noch geringe Restfehler aufweisen, sind die Dichtewerte von Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Neon mit noch relativ hohen Fehlern behaftet. Wie den Diagrammen 4 bis 6 zu entnehmen ist, können diese Restfehler mit Hilfe des Viskositätsparameters η^* deutlich reduziert werden.

Im Diagramm 4 der Fig. 4 ist der Restfehler gegen den Viskositätsparameter η^* aufgetragen. Wie aufgrund der Funktionsgleichung zu erwarten ist, lassen sich die Restfehler in diesem Diagramm ebenfalls gut durch eine Gerade approximieren. Die Steigung der Geraden liefert die typenspezifische Aufnehmerkonstante K_η .

Im Diagramm 5 ist der Restfehler der Dichte nach Korrektur des Viskositätseffekts mit Hilfe des 2. Terms von Gleichung (16) gegen den Viskositätsparameter η^* aufgetragen. Nachdem sowohl der Schallgeschwindigkeitseffekt als auch der Viskositätseffekt korrigiert wurden, sind die Dichten der sechs reinen Gase lediglich noch mit Restfehlern unterhalb von 0,1% behaftet. Dieser äußerst geringe Restfehler der Dichte ist im Diagramm 6 der Fig. 4 schließlich erneut gegen die Dichte aufgetragen, um einen besseren Vergleich mit dem Dichtemeßfehler gemäß Diagramm 1 zu ermöglichen.

Für Erdgase kann die Dichte gemäß dem folgenden vereinfachten Ausführungsbeispiel der Erfindung bestimmt werden. Es wurde festgestellt, daß die Schallgeschwindigkeit von Erdgas und die Viskosität von Erdgas überraschend gut mit den beiden folgenden Gleichungen bestimmt werden kann:

$$c_E = c_{\text{CH}_4}(T, \rho) + \Delta c_E(T, \rho, \rho_n) + \Delta c_E(T, \rho, H_n) + \Delta c_E(\rho, x_{\text{CO}_2}) \quad (19),$$

$$\eta_E = \eta_{\text{CH}_4}(T, \rho) + \Delta \eta_E(\rho, \rho_n) + \Delta \eta_E(H_n) \quad (20),$$

wobei die Δc_E und $\Delta \eta_E$ lediglich von den in den Klammern angegebenen Meßgrößen abhängige Korrekturterme bezeichnen.

Werden diese Näherungsterme für die Schallgeschwindigkeit und die Viskosität des Erdgases in die Gleichung (10) ein-

gesetzt, ergibt dies näherungsweise die Funktion gemäß Gleichung (8):

$$\rho_{\text{kor}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{\rho_n} \cdot \Delta\rho_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n + K_{\text{CO}_2} \cdot \Delta x_{\text{CO}_2}] + K_T \cdot \Delta T,$$

wobei K_{ρ_n} , K_{H_n} und K_{CO_2} Konstanten, Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, K_T eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} ist,

$$\Delta\rho_n = \rho_{n,\text{mess}} - \rho_{n,\text{kal}},$$

$$\Delta H_n = H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{kal}},$$

$$\Delta T = T_{\text{mess}} - T_{\text{kal}} \text{ und } \Delta x_{\text{CO}_2} = x_{\text{CO}_2,\text{mess}} - x_{\text{CO}_2,\text{kal}}.$$

Bei dem in Fig. 5 dargestellten besonders einfachen Ausführungsbeispiel der Erfindung ist $K_{\text{CO}_2} = 0$ und K_{ρ_n} sowie K_{H_n} sind Konstanten und für K_T gilt: $K_T = K_{T_0} + \rho_{\text{BDA}} \cdot K_{T_1}$, wobei K_{T_0} und K_{T_1} Konstanten sind.

In Fig. 5 ist die Wirkungsweise dieses vereinfachten Verfahrens zur Bestimmung der Dichte von Erdgas für sechs Erdgase dargestellt. Im Diagramm 1 ist der Dichtemeßfehler gegen die Dichte ohne Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens aufgetragen. Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, ist die Dichte mit einem Fehler von bis zu 0,5% behaftet.

Im Diagramm 2 der Fig. 5 ist der Dichtemeßfehler gegen die Dichte des Erdgases bei Normbedingungen aufgetragen. Wie aufgrund der Korrekturfunktion zu erwarten ist, lassen sich die Meßwerte in dieser Darstellung gut durch eine Gerade annähern. Die Steigung der Geraden liefert die Konstante K_{ρ_n} .

Im Diagramm 3 ist der Restfehler der Dichte nach Korrektur der Dichtewerte mit Hilfe des zweiten Terms der Gleichung (8) dargestellt. Der Restfehler beträgt für alle sechs untersuchten Erdgase nur noch weniger als 0,1%. Im Diagramm 4 ist dieser Restfehler der Dichte gegen den Brennwert des jeweiligen Erdgases unter Normbedingungen dargestellt. Auch hierbei lassen sich die bezüglich der Normdichte bereits korrigierten Meßwerte gut durch eine Gerade approximieren. An der Steigung der Geraden läßt sich die Konstante K_{H_n} ablesen.

Im Diagramm 5 ist der Restfehler der Dichte nach Korrektur mit Hilfe des dritten Terms gemäß Gleichung (8) dargestellt. Der verbleibende Restfehler beträgt nur noch weniger als 0,05%.

Im Diagramm 6 ist dieser Restfehler des erfindungsgemäßen Verfahrens gegen die Dichte dargestellt, um einen besseren Vergleich mit dem bisherigen Meßfehler gemäß Diagramm 1 zu ermöglichen.

Eine Korrektur bezüglich der Temperatur (4. Term der Gleichung 8) war in diesem Fall nicht erforderlich, da die Meßtemperatur mit der Kalibriertemperatur übereinstimmte.

Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens kann die Dichte je nach Anwendungsfall mit der gewünschten Genauigkeit bestimmt werden. Die zur Korrektur des Dichtemeßwertes benötigten Konstanten und Parameter der Korrekturfunktionen müssen für jeden Betriebsdichteaufnehmertyp lediglich einmal mit Hilfe von Referenzgasen bekannter Zusammensetzung bestimmt werden.

Im Rahmen der Erfindung sind zahlreiche Weiterbildungen möglich. Beispielsweise kann auch Stickstoff als Kalibriergas verwendet werden. Die Kalibrierung sollte möglichst in der Mitte des üblichen Betriebstemperaturbereiches liegen, jedoch können auch andere Kalibriertemperaturen gewählt werden. Die zur Bestimmung des Dichtemeßfehlers benötigten exakten Meßwerte für die Dichte können bei bekannter Zusammensetzung entweder berechnet werden oder mit einem entsprechend kostenaufwendigen hochpräzisen Betriebsdichteaufnehmer gemessen werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Dichte eines Gases, insbesondere von Erdgas, unter Betriebsbedingungen, wobei ein einen Schwingkörper enthaltender Betriebsdichteaufnehmer mit Hilfe eines Kalibriergases geeicht wird, und ein Dichtemeßwert des Gases unter Betriebsbedingungen (ρ_{BDA}) mit Hilfe des Betriebsdichteaufnehmers gemessen wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß

die Dichte oder Schallgeschwindigkeit sowohl des Gases als auch des Kalibriergases jeweils unter Normbedingungen ($\rho_{n,\text{mess}}$, $\rho_{n,\text{kal}}$, $c_{n,\text{mess}}$, $c_{n,\text{kal}}$) erfaßt wird und

die Dichte des Gases unter Betriebsbedingungen aus dem Dichtemeßwert mit Hilfe einer von der Differenz der Dichten oder der Schallgeschwindigkeiten des Gases und des Kalibriergases unter Normbedingungen abhängigen Korrekturfunktion bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{\text{kor}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{\rho_n} \cdot \Delta\rho_n],$$

wobei K_{ρ_n} eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur ist, und

$$\Delta\rho_n = \rho_{n,\text{mess}} - \rho_{n,\text{kal}}.$$

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{\text{kor}} = \rho_{\text{BDA}} \cdot [1 + K_{c_n} \cdot \Delta c_n],$$

wobei K_{c_n} eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur ist, und

$$\Delta c_n = c_{n,\text{mess}} - c_{n,\text{kal}}.$$

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß außerdem der Brennwert des Gases und des Kalibrier-
gases unter Normbedingungen ($H_{n,mess}$, $H_{n,kal}$) erfaßt wird und daß die Korrekturfunktion, die zur Bestimmung der
unter Betriebsbedingungen gemessenen Dichte verwendet wird, vom Brennwert des Gases und des Kalibrier-
gases unter Normbedingungen abhängig ist.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrek-
turfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{korr} = \rho_{BDA} \cdot [1 + K_{\rho_n} \cdot \Delta\rho_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n],$$

wobei K_{ρ_n} und K_{H_n} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, und

$$\Delta\rho_n = \rho_{n,mess} - \rho_{n,kal} \text{ und} \\ \Delta H_n = H_{n,mess} - H_{n,kal}.$$

6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrek-
turfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{korr} = \rho_{BDA} \cdot [1 + K_{c_n} \cdot \Delta c_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n],$$

wobei K_{c_n} und K_{H_n} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, und

$$\Delta c_n = c_{n,mess} - c_{n,kal} \text{ und} \\ \Delta H_n = H_{n,mess} - H_{n,kal}.$$

7. Verfahren nach Anspruch 1 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß außerdem die Temperatur des Gases unter Be-
triebsbedingungen (T_{mess}) und die Temperatur des Kalibriergases beim Kalibrieren (T_{kal}) erfaßt werden und daß die
Korrekturfunktion, die zur Bestimmung der unter Betriebsbedingungen gemessenen Dichte verwendet wird, von
der Betriebstemperatur des Gases und der Kalibriertemperatur des Kalibriergases abhängig ist.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrek-
turfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{korr} = \rho_{BDA} \cdot [1 + K_{\rho_n} \cdot \Delta\rho_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n] + K_T \cdot \Delta T,$$

wobei K_{ρ_n} und K_{H_n} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, K_T eine Konstante oder
eine Funktion von ρ_{BDA} ist, und

$$\Delta\rho_n = \rho_{n,mess} - \rho_{n,kal}, \\ \Delta H_n = H_{n,mess} - H_{n,kal} \text{ und} \\ \Delta T = T_{mess} - T_{kal}.$$

9. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrek-
turfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{korr} = \rho_{BDA} \cdot [1 + K_{c_n} \cdot \Delta c_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n] + K_T \cdot \Delta T,$$

wobei K_{c_n} und K_{H_n} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, K_T eine Konstante oder
eine Funktion von ρ_{BDA} ist, und

$$\Delta c_n = c_{n,mess} - c_{n,kal}, \\ \Delta H_n = H_{n,mess} - H_{n,kal} \text{ und} \\ \Delta T = T_{mess} - T_{kal}.$$

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1, 4 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß außerdem der Kohlenstoffdi-
oxidanteil des Gases und des Kalibriergases ($x_{CO_2,mess}$, $x_{CO_2,kal}$) erfaßt wird und daß die Korrekturfunktion, die zur
Bestimmung der unter Betriebsbedingungen gemessenen Dichte verwendet wird, von dem Kohlenstoffdioxidanteil
des Gases und des Kalibriergases abhängig ist.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Kor-
rekturfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{korr} = \rho_{BDA} \cdot [1 + K_{\rho_n} \cdot \Delta\rho_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n + K_{CO_2} \cdot \Delta x_{CO_2}] + K_T \cdot \Delta T,$$

wobei K_{ρ_n} , K_{H_n} und K_{CO_2} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, K_T eine Konstante
oder eine Funktion von ρ_{BDA} ist, und

$$\Delta\rho_n = \rho_{n,mess} - \rho_{n,kal}, \\ \Delta H_n = H_{n,mess} - H_{n,kal}, \\ \Delta T = T_{mess} - T_{kal} \text{ und}$$

$$\Delta x_{CO_2} = x_{CO_2, mess} - x_{CO_2, kal}$$

12. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{kor} = \rho_{BDA} \cdot [1 + K_{c_n} \cdot \Delta c_n + K_{H_n} \cdot \Delta H_n + K_{CO_2} \cdot \Delta x_{CO_2}] + K_T \cdot \Delta T,$$

wobei K_{c_n} , K_{H_n} und K_{CO_2} Konstanten oder Funktionen von ρ_{BDA} und/oder der Temperatur sind, K_T eine Konstante oder eine Funktion von ρ_{BDA} ist, und

$$\Delta c_n = c_{n, mess} - c_{n, kal},$$

$$\Delta H_n = H_{n, mess} - H_{n, kal},$$

$$\Delta T = T_{mess} - T_{kal} \text{ und}$$

$$\Delta x_{CO_2} = x_{CO_2, mess} - x_{CO_2, kal}.$$

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß K_T mit Hilfe der folgenden Funktion bestimmt wird: $K_T = K_{T_0} + \rho_{BDA} \cdot K_{T_1}$, wobei K_{T_0} und K_{T_1} Konstanten sind.

14. Verfahren zur Bestimmung der Dichte eines Gases, insbesondere von Erdgas, unter Betriebsbedingungen, wobei

ein einen Schwingkörper enthaltender Betriebsdichteaufnehmer mit Hilfe eines Kalibriergases geeicht wird,

und ein Dichtemeßwert des Gases unter Betriebsbedingungen (ρ_{BDA}) mit Hilfe des Betriebsdichteaufnehmers gemessen wird, dadurch gekennzeichnet, daß

die Schallgeschwindigkeit und die Viskosität sowohl des Gases als auch des Kalibriergases jeweils unter Betriebsbedingungen (c_{mess} , c_{kal} , η_{mess} , η_{kal}) bestimmt wird und

die Dichte des Gases unter Betriebsbedingungen aus dem Dichtemeßwert mit Hilfe einer von der Schallgeschwindigkeit und der Viskosität des Gases und des Kalibriergases abhängigen Korrekturfunktion bestimmt wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{kor} = \rho_{BDA} \cdot \frac{1 + \frac{K_c^2}{\tau^2 \cdot c_{kal}^2} + K_\eta \cdot \sqrt{\frac{\tau \cdot \eta_{kal}}{\rho_{BDA}}}}{1 + \frac{K_c^2}{\tau^2 \cdot c_{mess}^2} + K_\eta \cdot \sqrt{\frac{\tau \cdot \eta_{mess}}{\rho_{kor}}}} + [(K_{T_0} + \rho_{BDA} \cdot K_{T_1}) \cdot (T_{mess} - T_{kal})],$$

wobei τ : Periodendauer des Schwingkörpers,

T: Temperatur und

K_c , K_η , K_{T_0} , K_{T_1} Konstanten sind.

16. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Dichte des Gases mit Hilfe der folgenden Korrekturfunktion bestimmt wird:

$$\rho_{kor} = \rho_{BDA} \cdot \left[1 + \frac{K_c^2}{\tau^2 \cdot c_{kal}^2} \cdot \left(1 - \frac{c_{kal}^2}{c_{mess}^2} \right) + K_\eta \cdot \sqrt{\frac{\tau \cdot \eta_{kal}}{\rho_{BDA}}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\eta_{mess}}{\eta_{kal}}} \right) \right] + [(K_{T_0} + \rho_{BDA} \cdot K_{T_1}) \cdot (T_{mess} - T_{kal})],$$

wobei τ : Periodendauer des Schwingkörpers,

T: Temperatur und

K_c , K_η , K_{T_0} , K_{T_1} Konstanten sind.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß Methan als Kalibriergas verwendet wird.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß K_c^2 und K_η durch Kalibrierung mit einem zweiten Kalibriergas neben Methan, z. B. Argon, Ethen oder Stickstoff, bestimmt werden und als typenspezifische Konstanten behandelt werden.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Schallgeschwindigkeit des Gases und/oder des Kalibriergases als Funktion der Dichte unter Betriebsbedingungen und der Dichte unter Normbedingungen und/oder der Temperatur und/oder des Brennwertes und/oder des Kohlenstoffdioxidanteils bestimmt wird.

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß bei Bestimmung der Dichte von Erdgas als Kalibriergas Methan verwendet wird,

daß die Schallgeschwindigkeit von Methan (c_{CH_4}) nach folgender Gleichung berechnet wird:

$$c_{CH_4} = A_0 + (A_1 + A_2 \cdot T_{mess}) \cdot T_{mess} + (A_3 + A_4 \cdot \rho_{BDA} + A_5 \cdot \rho_{BDA}^2) \cdot \rho_{BDA} + (A_6 + A_7 \cdot T_{mess}) \cdot T_{mess} \cdot \rho_{BDA}$$

und die Schallgeschwindigkeit des Erdgases (c_{mess}) nach folgender Gleichung bestimmt wird:

$$C_{\text{mess}} = C_{\text{CH}_4} + [(B_1 + B_2 \cdot \Delta\rho_n + B_3 \cdot T_{\text{mess}}) + (B_4 + B_5 \cdot T_{\text{mess}} + B_6 \cdot \rho_{\text{BDA}} + B_7 \cdot \rho_{\text{BDA}} \cdot \Delta\rho_n) \cdot \rho_{\text{BDA}}] \cdot \Delta\rho_n \\ + [(C_1 + C_2 \cdot T_{\text{mess}}) + (C_3 + C_4 \cdot \rho_{\text{BDA}} + C_5 \cdot T_{\text{mess}}) \cdot \rho_{\text{BDA}}] \cdot \Delta H_n + [D_1 \cdot \rho_{\text{BDA}}] \cdot X_{\text{CO}_2},$$

wobei A_0 – A_7 , B_1 – B_7 , C_1 – C_5 und D_1 Konstanten sind,

X_{CO_2} den Kohlenstoffdioxidanteil im Erdgas angibt,

$\Delta\rho_n = \rho_{n,\text{mess}} - \rho_{n,\text{CH}_4}$ und

$\Delta H_n = H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{CH}_4}$.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Viskosität des Gases und/oder des Kalibrierungsgases als Funktion der Dichte unter Betriebsbedingungen und der Dichte unter Normbedingungen und/oder der Temperatur und/oder des Brennwertes bestimmt wird.

22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß bei Bestimmung der Dichte von Erdgas als Kalibrierungsgas Methan verwendet wird,

daß die Viskosität von Methan (η_{CH_4}) nach folgender Gleichung berechnet wird:

$$\eta_{\text{CH}_4} = A_0 + A_1 \cdot T + (A_2 + A_3 \cdot \rho_{\text{BDA}}) \cdot \rho_{\text{BDA}}$$

und die Viskosität des Erdgases (η_{mess}) nach folgender Gleichung bestimmt wird:

$$\eta_{\text{mess}} = \eta_{\text{CH}_4} + B_1 (1 - \rho_{\text{BDA}}) \cdot \Delta\rho_n + B_2 \cdot \Delta H_n$$

wobei A_0 – A_3 , B_1 und B_2 Konstanten sind,

$\Delta\rho_n = \rho_{n,\text{mess}} - \rho_{n,\text{CH}_4}$ und

$\Delta H_n = H_{n,\text{mess}} - H_{n,\text{CH}_4}$.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß zum Auffinden der Parameter und Konstanten geeigneter Funktionen, insbesondere der Korrekturfunktionen, mehrere Meßzyklen mit Referenzgasen durchgeführt werden, deren Zusammensetzungen bekannt sind.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

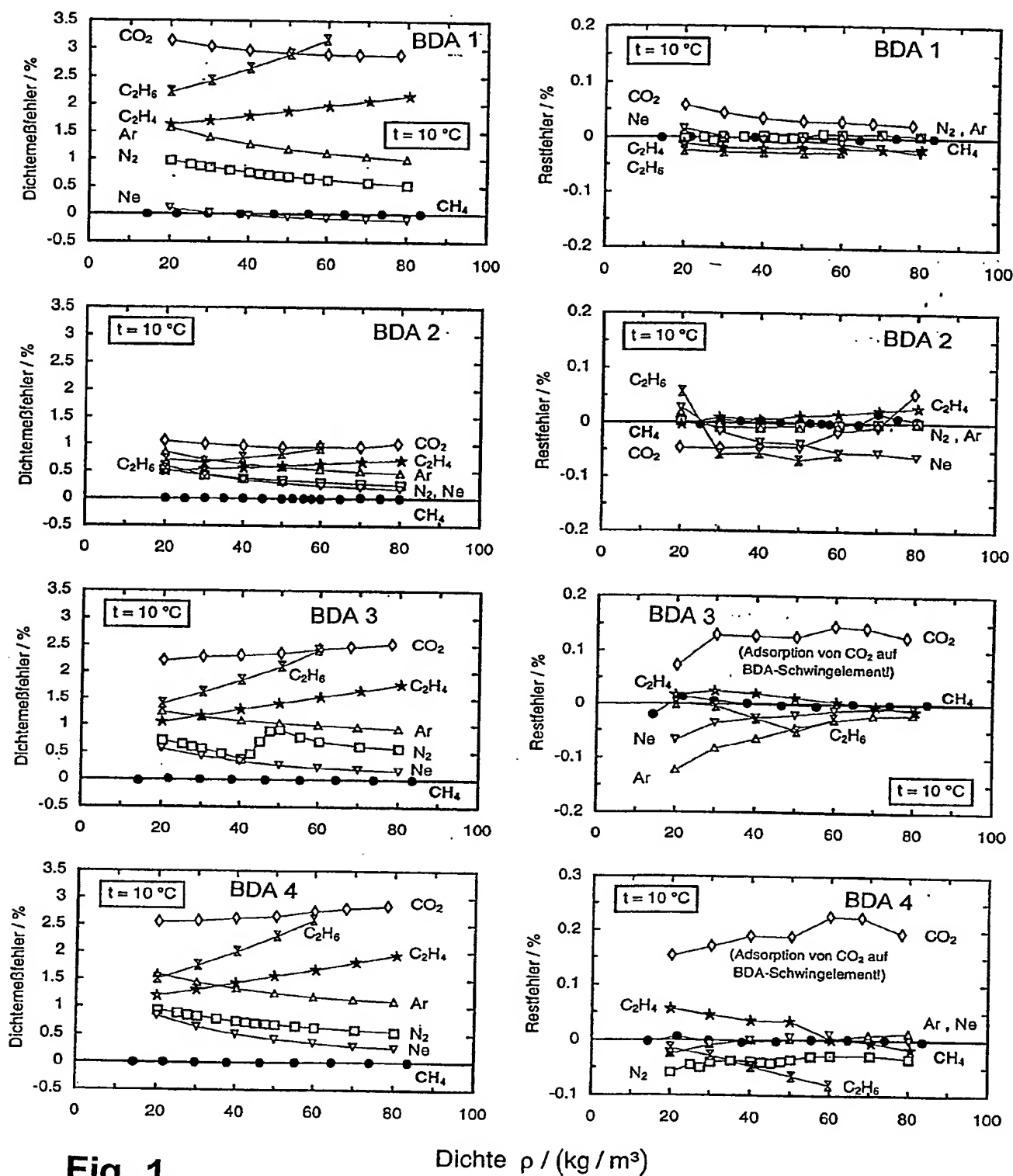


Fig. 1

Dichte $\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$

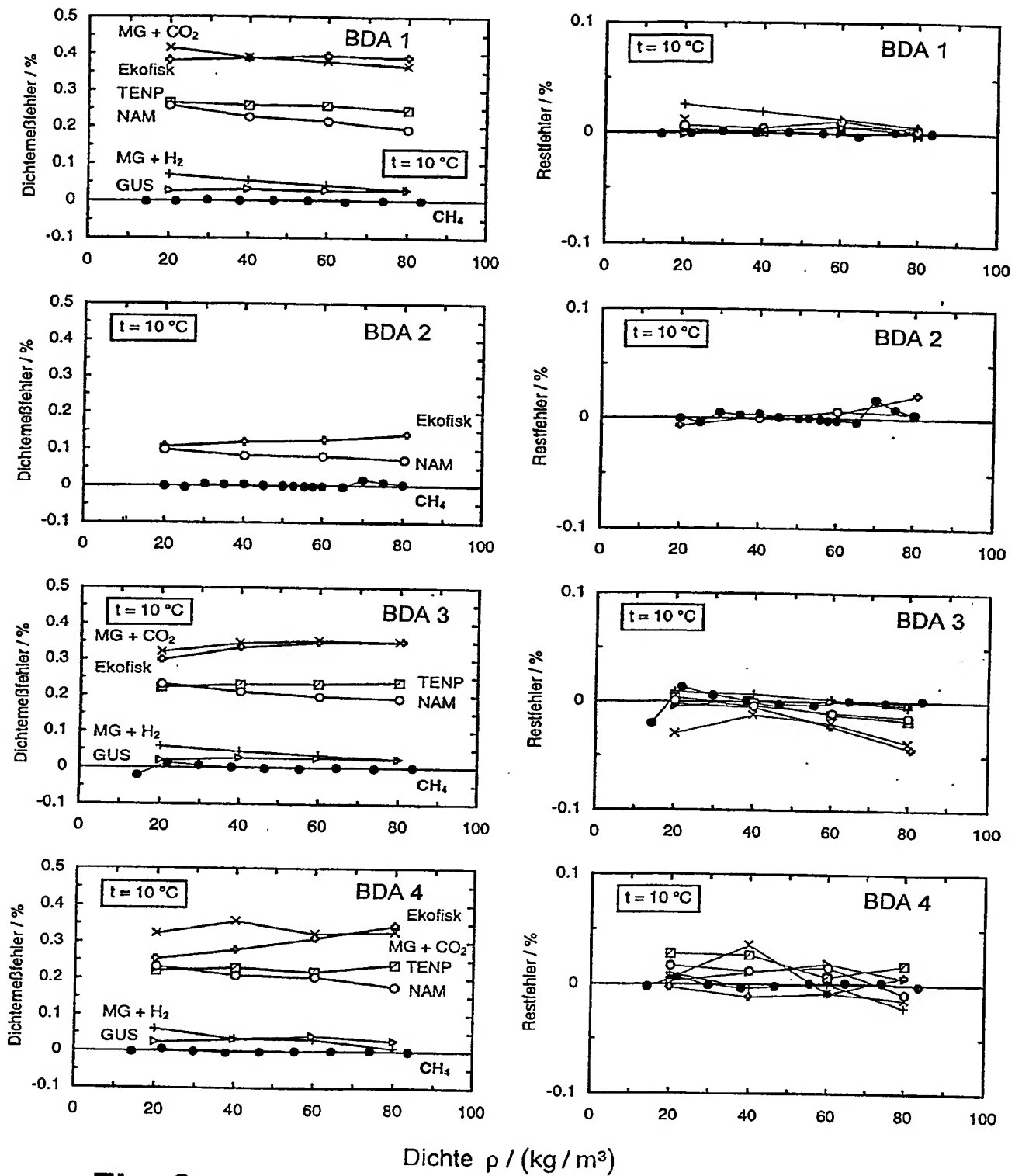


Fig. 2

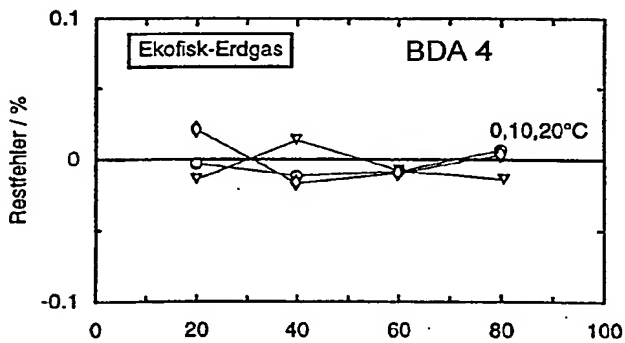
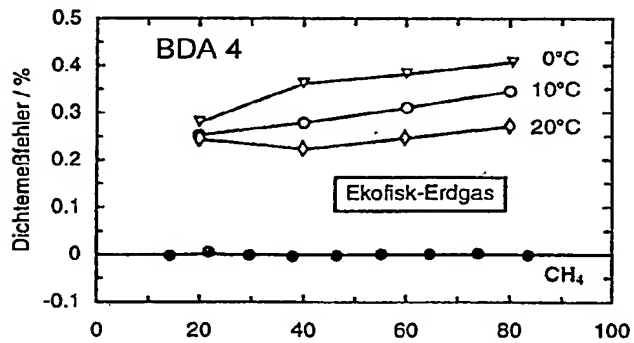
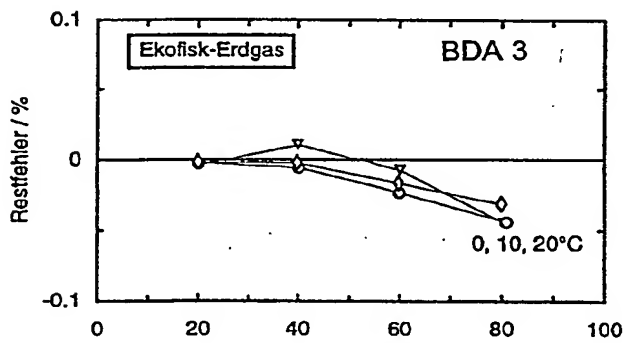
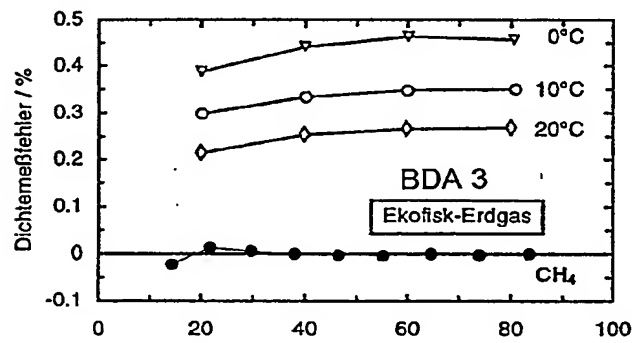
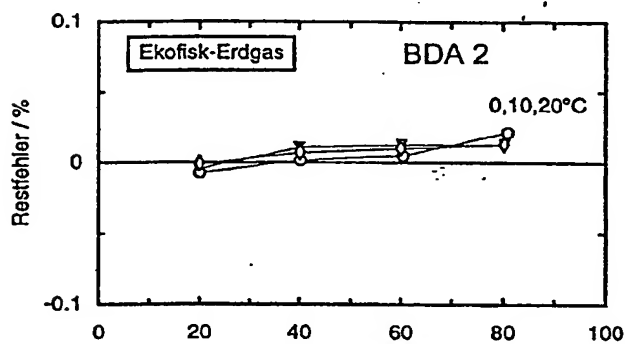
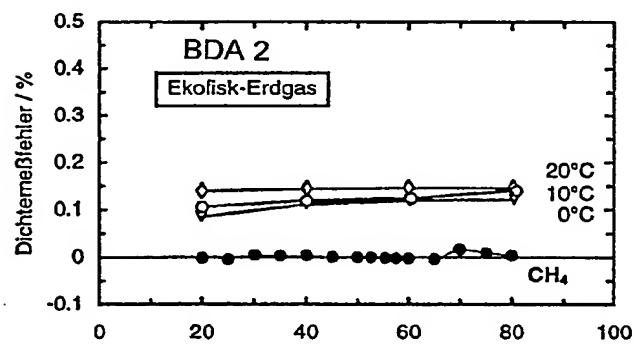
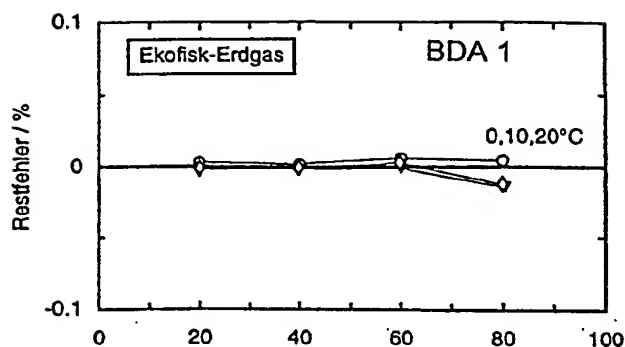
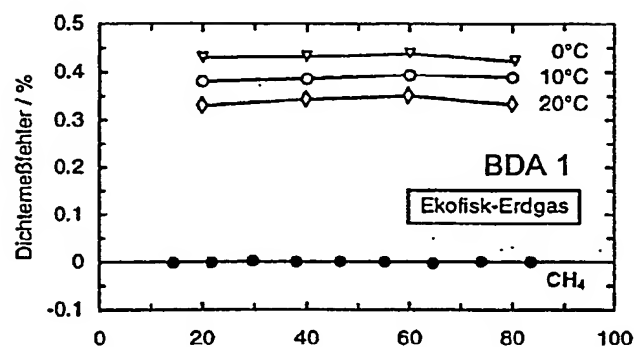


Fig. 3

Dichte ρ / (kg / m³)

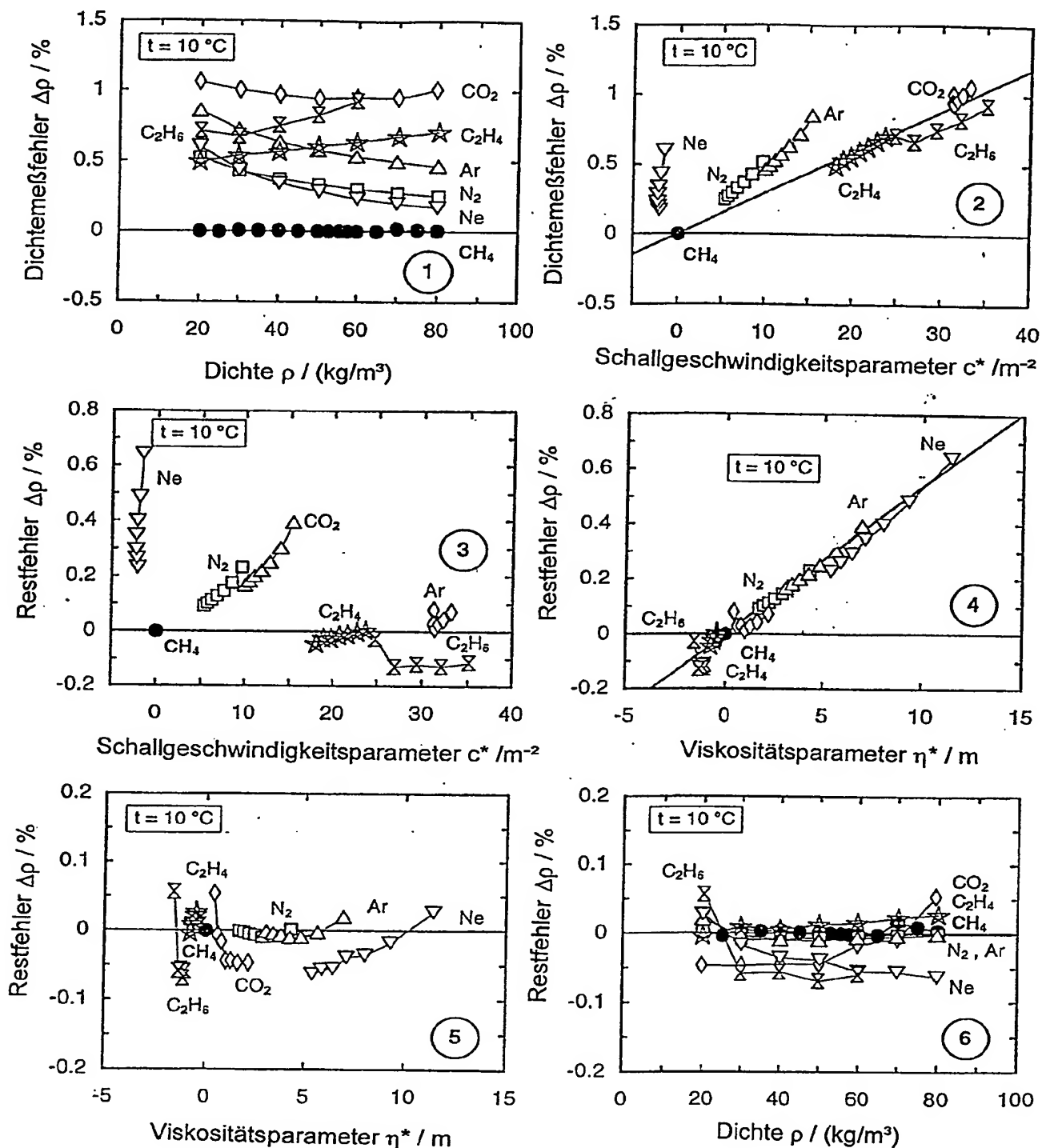


Fig. 4

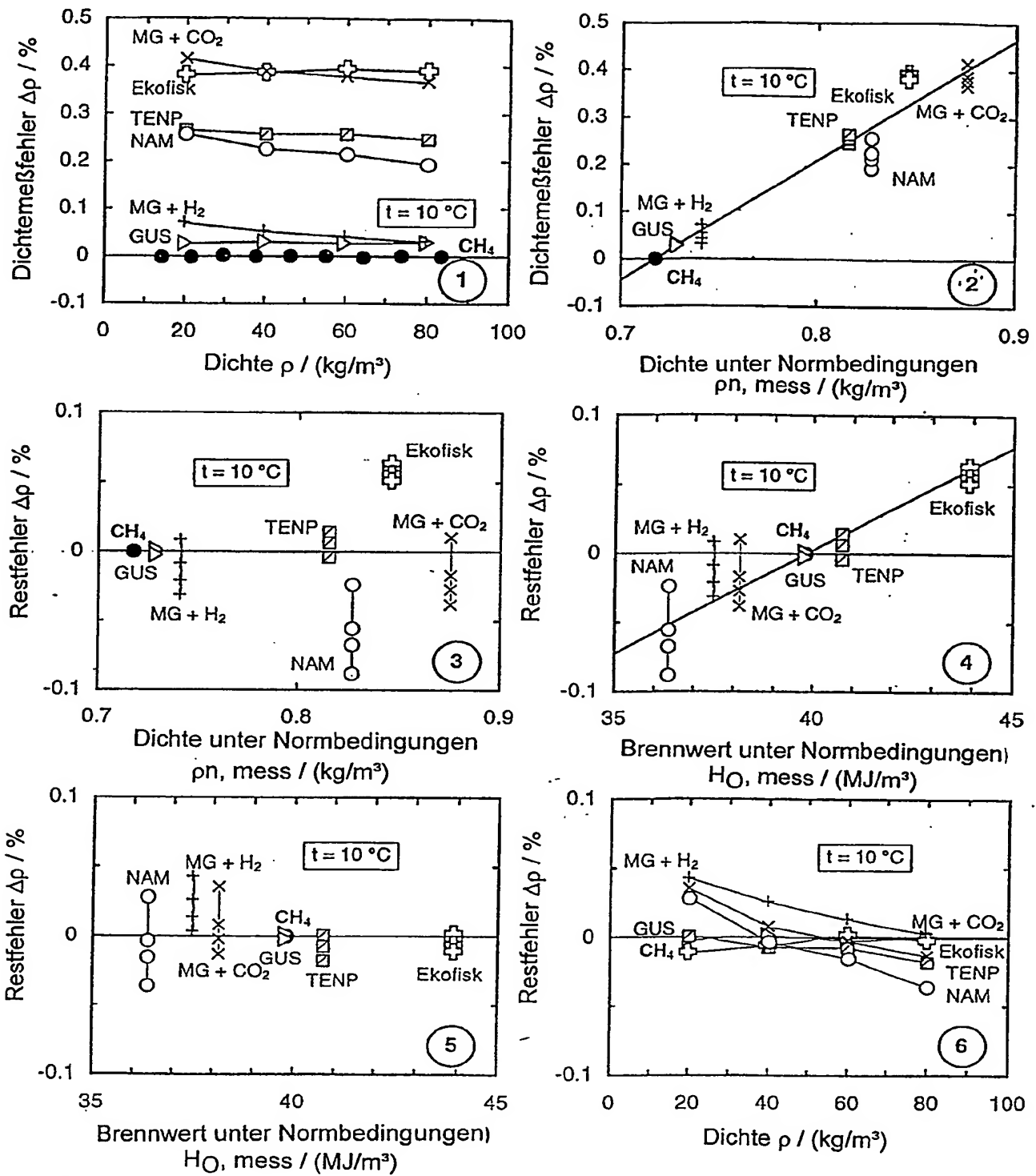


Fig. 5